第47卷 第1期
2024年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 1
Jan. 2024

中亚5月土壤湿度异常对6月降水的影响

刘文丽， 陈 樟， 赵 勇， 梁雨欣

（成都信息工程大学大气科学学院，四川 成都 610225）

摘 要：利用1980—2019年欧洲中期天气预报中心提供的ERA5月平均再分析数据和全球降水气候中心（GPCC）提供的逐月降水数据，分析中亚前期5月土壤湿度异常对后期6月局地降水变化的影响。结果表明：（1）中亚春季逐月土壤湿度总体表现为北部和中部高、西南和东南低的空间分布特征；3—4月土壤湿度年际变化的大值区主要位于中亚西南部；中亚北部土壤湿度在3月呈显著增加趋势，4—5月显著减少；中亚西南部3月土壤湿度显著减少。（2）中亚中部地区5月土壤湿度异常与当地6月的降水变化呈显著正相关，通过95%信度检验。5月土壤湿度正异常可以持续到6月，导致6月局地蒸发量增加，大气可降水量增多；同时地表向上潜热通量增加、感热通量减少、波恩比减小，进而导致大气边界层降低、低层大气湿熵增加、对流不稳定能量增大，有利于降水天气的发生。（3）前冬Niño3.4指数与中亚中部地区次年5月土壤湿度和6月降水异常都呈显著正相关，5月土壤湿度是厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）影响次年6月中亚中部地区降水异常的重要媒介，但土壤湿度可独立于ENSO影响6月降水。

关 键 词：中亚；土壤湿度；降水；蒸发；ENSO

文章编号：1000－6060(2024)01－0038－10(0038～0047)

中亚地处欧亚大陆腹地，是世界上最大的内陆干旱区，水资源稀缺，生态环境脆弱[1]。中亚地区气候主要受西风环流控制，降水集中在冬季和春季，西风环流的强度和位置直接调控中亚地区的降水变化[2-3]。已有研究表明，当北大西洋涛动位于负位相时，西风环流加强，有利于更多的水汽从地中海输送到中亚地区，导致中亚降水增多[4-5]。厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）也与中亚降水变化密切联系，强厄尔尼诺年，中亚地区异常上升运动和来自北大西洋和阿拉伯海的水汽输送导致中亚降水从当年冬季到次年夏季持续性增多[6-8]。印度洋海温、丝绸之路遥相关型、南亚高压和青藏高原夏季风等因子也会显著影响中亚上空的水汽条件和动力条件的配置，进而导致中亚降水异常[9-12]。

土壤湿度反映地表水文过程，其通过对地表水分和能量平衡的改变，影响区域天气和气候[13]。大量观测和数值试验结果证实土壤湿度对降水变化有着显著影响[14-15]。潮湿的土壤可以通过增强表面蒸发，改变地表热通量及环流场，从而引起降水变化[16-17]。如北美西部、西亚以及东亚部分地区，偏高的土壤湿度会引起该区域降水的加强[18]。近年来不少研究强调了春季土壤湿度对夏季降水变化的影响[19-20]，如欧亚大陆北部晚春土壤湿度异常通过影响陆-气间的能量传递进而影响夏季东亚大气环流，是其对东亚降水产生影响的重要方式；中南半岛、印度和德国南部的春季土壤湿度异常通过不同的途径反馈于该区域和周围地区夏季降水[21-24]。

中亚是全球土壤湿度影响降水的主要关键区之一，强烈的蒸发是干旱区水汽的重要来源之一，对局地降水的贡献不容忽视[25-27]。Chen等[8]指出强厄尔尼诺事件发生后，同期冬季和次年春季的降水正异常可通过加大局地土壤湿度导致次年夏季降

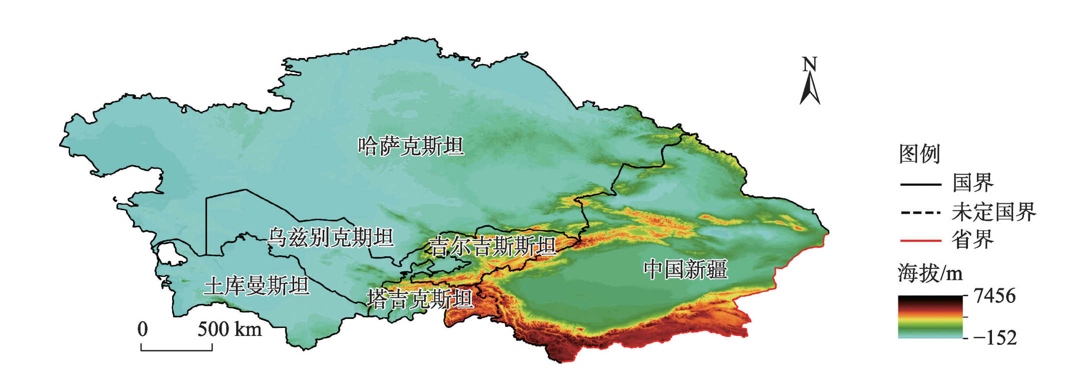
收稿日期：2023-06-14； **修订日期**：2023-07-18
基金项目：国家自然科学基金（41875102）；成都信息工程大学科研基金项目（KYTZ201726）资助
作者简介：刘文丽（1998-），女，硕士研究生，主要从事陆气相互作用研究. E-mail: liuwl_lily@163.com
通讯作者：陈樟（1989-），女，博士，副教授，主要从事海陆气相互作用等方面的研究. E-mail: chenzhang@cuit.edu.cn

水也增多，但土壤湿度影响降水的具体物理过程尚不清楚，土壤湿度是否独立于ENSO影响降水也需要进一步探讨。本文围绕中亚春季土壤湿度对后期降水影响的科学问题，首先分析了中亚春季(3—5月)逐月土壤湿度的时空变化特征，然后确定土壤湿度影响局地降水的关键月份和关键区域，并且从水汽条件和动力条件2个角度揭示了前期土壤湿度对后期降水影响的关键物理过程，最后探讨了土壤湿度和ENSO对中亚降水影响的关联和独立性。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中亚包括哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦和中国西北部分地区，地域广阔且地貌类型丰富多样，地表以山地和盆地为主，整体呈现东高西低的分布特征(图1)。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4393号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

Yu等[28]评估了多套土壤湿度产品在中亚地区的适用性，指出欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium Range Weather Forecasts，EC-MWF)提供的ERA5土壤湿度资料同中亚土壤湿度实际观测资料最为接近，可用于描述中亚土壤湿度的变化。因此，本文利用ERA5提供的1980—2019年月平均表层(0~7 cm)土壤体积水含量进行土壤湿度分析。同时，采用了ERA5提供的1980—2019年月平均大气再分析数据，包括地表气温、蒸发量、水汽含量、可降水量、感热通量、潜热通量、边界层厚度和对流有效位能等[29-30]。除土壤湿度、蒸发量、地表温度、感热通量和潜热通量的水平分辨率为0.1°×0.1°外，其余变量的水平分辨率为0.25°×0.25°。1980—2019年月平均降水数据源自全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Centre，GPCC)，空间分辨率为0.5°×0.5°[31]。1979—2019年Niño 3.4指数来自气候预测中心(Climate Prediction Center，CPC)。

1.3 研究方法

研究采用Pearson系数确定了中亚春季土壤湿度与夏季降水的逐月超前滞后相关性，采用合成、回归和T检验法分析了土壤湿度影响降水变化的物理过程，最后使用偏相关系数揭示了ENSO和土壤湿度对降水的独立影响。其中，偏相关分析是指在多要素构成的系统中，当研究某一个要素对另一个要素的影响或相关程度时，排除其他要素的影响，单独研究2个要素之间相关关系的方法，得到的相关系数称为偏相关系数。若有3个变量x_1、x_2、x_3，排除x_3的影响，x_1和x_2之间的偏相关系数($r_{12(3)}$)可表达为：

$$r_{12(3)} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{1 - r_{13}^2}\sqrt{1 - r_{23}^2}} \quad (1)$$

式中：r_{12}为变量x_1和x_2的相关系数；r_{23}为变量x_2和x_3的相关系数；r_{13}为变量x_1和x_3的相关系数。

2 结果与分析

2.1 中亚春季土壤湿度的逐月变化特征

1980—2019年中亚3月土壤湿度表现为北部和中部高、西南和东南低的空间分布特征(图2a)。土壤湿度极小值位于中国西北部地区，低于0.1 m^3·m^{-3}；极大值位于哈萨克斯坦北部。这可能与土地覆盖

类型有关，哈萨克斯坦北部遍布广阔的农田，而土库曼斯坦、乌兹别克斯坦和中国西北地区的土地大多裸露[28]。4月中亚地区土壤湿度气候态的空间分布与3月相似，但哈萨克斯坦南部、中亚西南部等地的土壤湿度比3月有所降低（图2b）。相较于4月，哈萨克斯坦全区5月土壤湿度进一步降低，吉尔吉斯坦、塔吉克斯坦为土壤湿度的大值中心（图2c）。综上，中亚春季逐月土壤湿度气候态的空间差异和季节内差异均较大，中亚北部和中部为土壤湿度的大值区，中亚西南和东南部为土壤湿度的低值区；中亚北部土壤湿度从3月到5月逐月降低。

中亚3—5月土壤湿度的年际变化也存在明显的空间差异和季节内差异。总体来看，春季内，中国西北区域始终为中亚土壤湿度年际变化最小的区域（图2d~f）。虽然3—4月中亚西南部土壤湿度气候态较小（图2a~b），但该区域为土壤湿度标准差的大值区，年际变化明显，并且3月数值高于4月（图2d~e）。中亚西南部土壤湿度标准差在5月进一步降低，中亚北部标准差增大，中亚中部成为5月土壤湿度变化大值区（图2f）。

由1980—2019年中亚3—5月逐月土壤湿度的线性趋势（图3）可见，3月哈萨克斯坦北部土壤湿度呈显著增长趋势；中亚西南部包括哈萨克斯坦南部以及乌兹别克斯坦等地的土壤湿度呈显著变干趋势。中国西北地区和塔吉克斯坦-吉尔吉斯坦分别表现为变干和变湿趋势，但未通过显著性检验（图3a）。4月和5月土壤湿度趋势变化的空间分布较为类似，主要表现为哈萨克斯坦土壤湿度显著降低，其他区域趋势变化较弱（图3b~c）。总之，中亚春季土壤湿度的趋势变化表现出明显的空间差异和季节内差异，中亚北部土壤湿度在3月呈显著增加趋势，而4—5月则呈显著减少趋势；中亚西南部3月土壤湿度显著减少；中国西北地区的减少趋势较弱，未通过显著性检验。

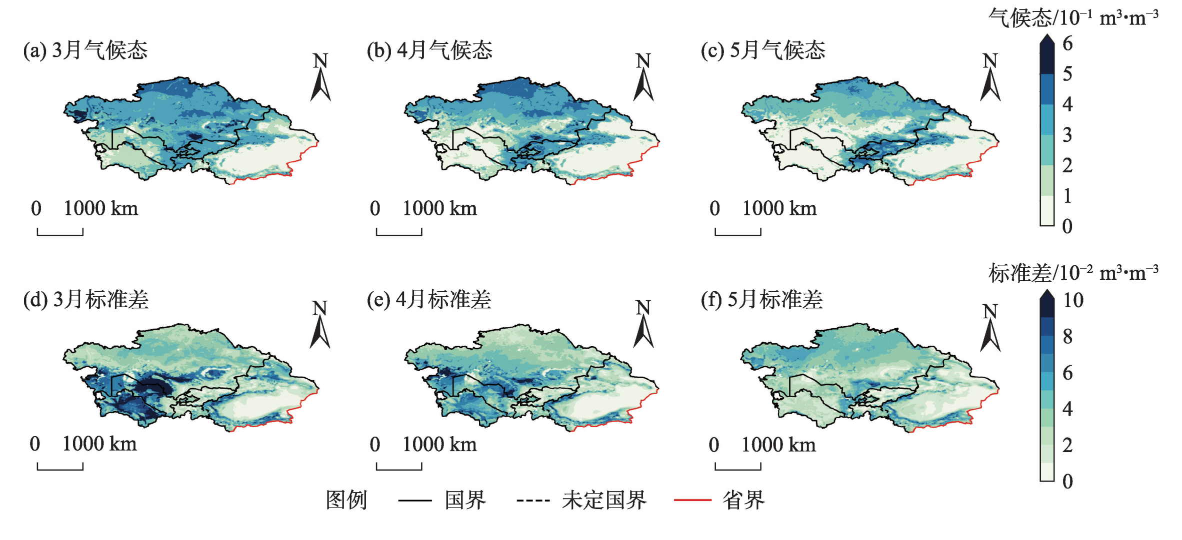


图2 1980—2019年3—5月中亚土壤湿度气候态和标准差的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution climate state and standard deviation of soil moisture in Central Asia in March-May of 1980—2019

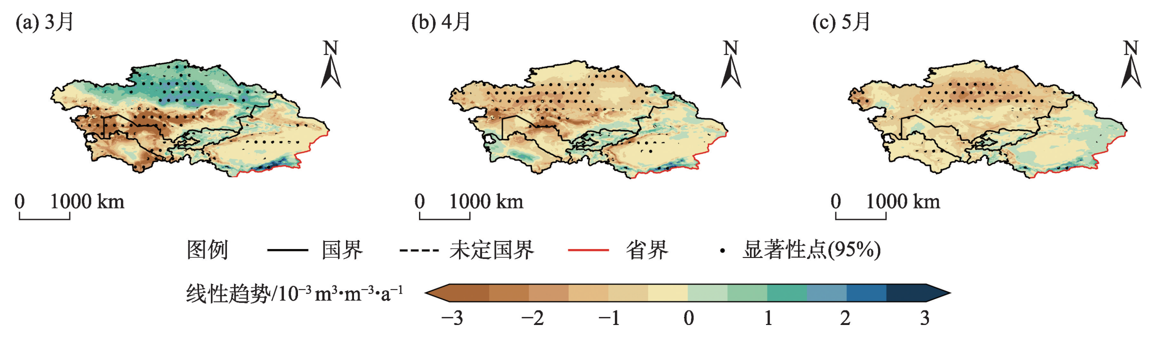


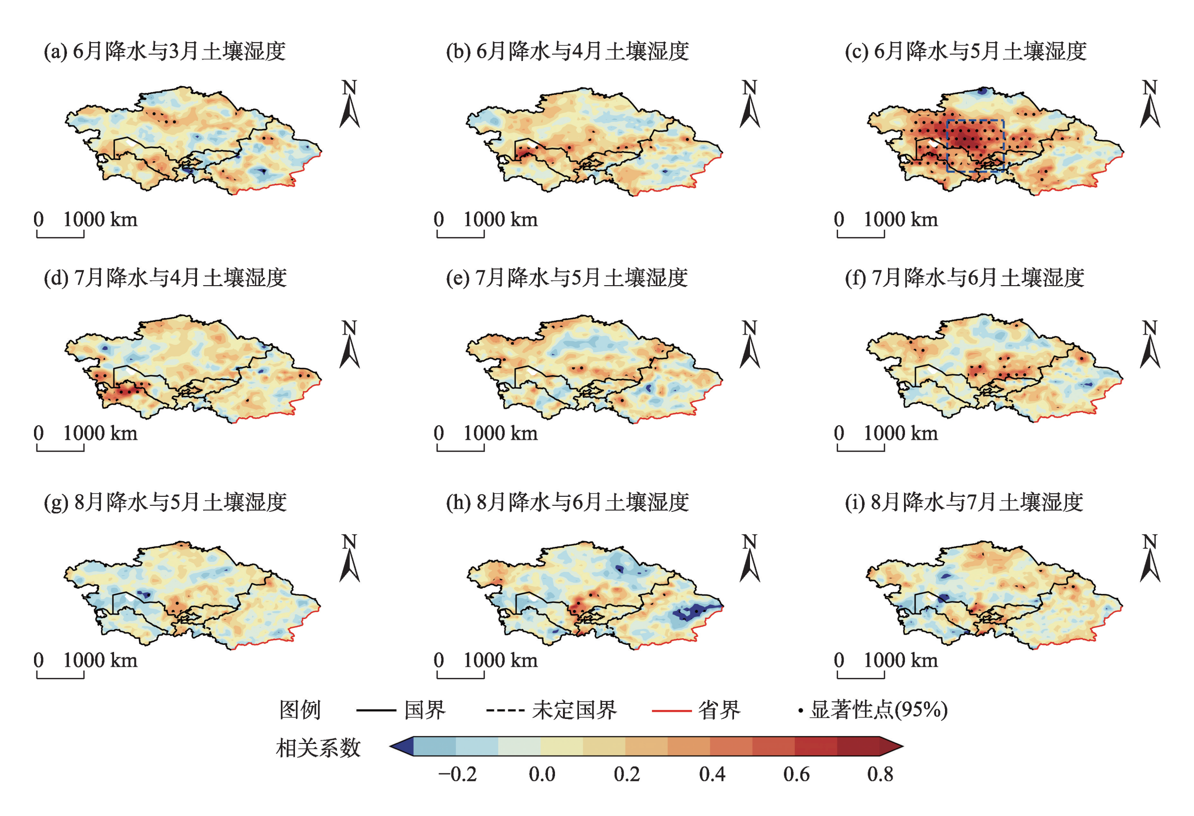
图3 1980—2019年3—5月中亚土壤湿度的趋势分布

Fig. 3 Trend distribution of soil moisture in Central Asia in March-May of 1980—2019

2.2 春季土壤湿度与夏季降水的逐月超前滞后相关

土壤湿度和局地降水之间的关系复杂，两者可相互影响。一方面更多的降水可能导致土壤变湿，另一方面湿润的土壤也可以通过改变蒸发导致降水的增多[8]。本文主要考察土壤湿度对降水的影响，因此更关注前期土壤湿度对后期降水的影响。考虑中亚夏季(6—8月)逐月的降水变化与超前3个月的土壤湿度之间的局地相关，例如6月降水分别与前期3月、4月、5月土壤湿度的相关。由图4可知，6月降水与前期5月土壤湿度异常在中亚中部地区呈显著正相关(图4c)，与前期3—4月土壤湿度的相关性较弱(图4a~b)。7—8月的降水与前3个月土壤湿度的相关性普遍较弱且分布零散(图4d~f和图4g~i)。利用欧洲航天局气候变化倡议发布的多源卫星融合土壤水分产品(ESA CCI_SM)、美国国家航空航天局NASA发布的全球高分辨率陆面数据同化系统(FLDAS)和美国全球陆面数据同化系统(GLDAS)等土壤湿度产品重复上述分析(图略)，所得结果与图4一致。由于中亚夏季逐月降水和前期土壤湿度之间的局地关系存在明显的季节内差异，把整个季节进行平均来研究降水和土壤湿度两者关系的方法具有一定的局限性，因此本文考虑降水-土壤湿度逐月相关更合理。中亚中部5月土壤湿度与后期6月局地降水关系密切，根据图4c的结果，选择关键区(39~49°N、62~73°E)作为后续重点研究区域。

将标准化的关键区区域平均的土壤湿度时间序列和降水时间序列分别定义为土壤湿度指数和降水指数，用以表征关键区土壤湿度异常和降水量异常的年际变化情况。土壤湿度指数和降水指数都具有明显的年际变化，且两者变化较为一致(图5a)。5月土壤湿度指数和6月降水指数之间的相关系数为0.70，通过99%信度检验，说明本文定义的土壤湿度指数和降水指数可用于中亚中部关键区土壤湿度-降水两者关系的研究。基于5月土壤湿度指数，以1个标准差为标准，挑选出中亚中部关键区5月土壤湿度异常高值年共6 a，异常低值年共5 a(表1)。对挑选出的5月土壤湿度异常年随后6月降水异常进行合成(图5b)，所得结果的空间分布与图4c类似，表现为土壤湿度偏高时，关键区6月降水偏多(图5b)。以上结果再次揭示出，中亚中部地区5月土壤湿度与后期6月局地降水的密切相关。



注：图c中蓝色方框区域为中亚5月土壤湿度影响6月局地降水的关键区(39~49°N、62~73°E)。下同。

图4 1980—2019年夏季降水与前期局地土壤湿度之间的超前滞后相关

Fig. 4 Lead-lag correlation coefficients between the summer precipitation and the preceding soil moisture during 1980—2019

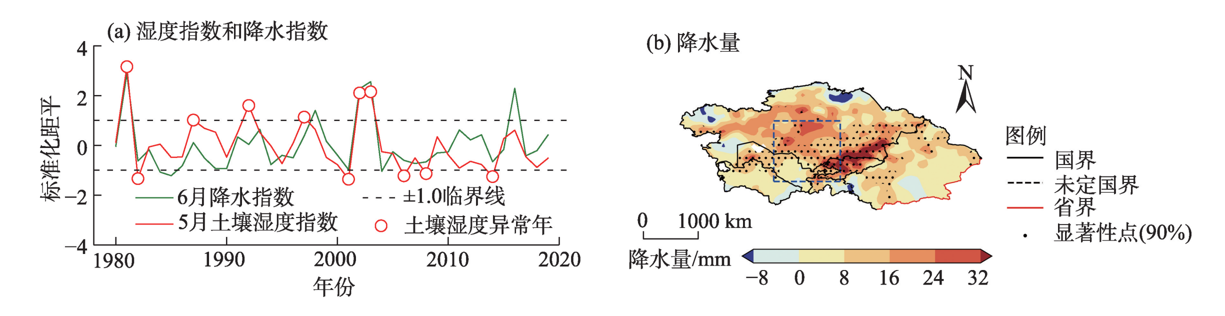


图5 1980—2019年中亚关键区5月土壤湿度指数、6月降水指数标准化序列和5月土壤湿度高值年减去低值年合成的6月降水量

Fig. 5 Normalized time series of the soil moisture index in May and precipitation index in June and the precipitation in June synthesized by subtracting the low value year from the high value year of soil moisture in May during 1980—2019

表1 1980—2019年中亚中部关键区5月土壤湿度异常高低年

Tab. 1 Abnormal years of soil moisture based on the normalized soil moisture index in May of 1980—2019

5月土壤湿度	年份
高值年(标准差>1)	1981、1987、1992、1997、2002、2003
低值年(标准差<-1)	1982、2001、2006、2008、2014

2.3 土壤湿度异常影响降水变化的物理过程

5月土壤湿度异常如何影响后期6月的降水变化？前人研究发现，土壤湿度具有较好的记忆性[32]，因此本文考虑5月土壤湿度异常是否可以持续到6月，通过改变6月大气条件导致降水异常。图6给出了5月土壤湿度异常年合成的随后6月土壤湿度差值。从图中可以看出，5月土壤湿度偏湿时，中亚中部6月土壤湿度仍然呈现大范围显著正异常(图6)，说明中亚中部土壤湿度异常可以从5月持续至6月。计算得到关键区5月土壤湿度指数与6月土壤湿度指数的相关系数高达0.85，通过了99%的显著性检验，印证了土壤湿度异常可以从5月持续到6月。

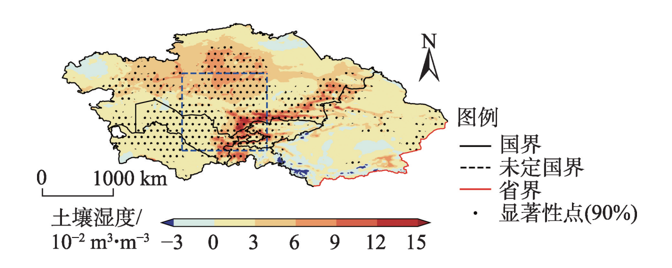


图6 1980—2019年5月土壤湿度高值年减去低值年合成的6月土壤湿度

Fig. 6 Soil moisture in June synthesized by subtracting the low value year from the high value year of soil moisture in May during 1980—2019

土壤湿度的异常可以通过改变蒸发量影响局地降水。由5月土壤湿度异常年合成的6月蒸发量差值图(图7a)可以看出，5月土壤湿度偏湿年，因土壤湿度正异常可持续到6月(图6)，导致中亚中部地区6月局地蒸发量增加(图7a)。强烈的蒸发为局地降水提供了重要的水汽来源，关键区6月空气中的水汽含量(图7b)和大气可降水量(图7c)均增加，有利于当地6月降水增多。5月土壤湿度指数回归的6月蒸发量(图7d)、水汽含量(图7e)和大气可降水量(图7f)异常情况与上述合成结果相符，表现为5月土壤湿度指数偏大时，关键区6月蒸发量、水汽含量和可降水量均为正异常。

土壤湿度异常也能够通过改变陆-气之间的能量收支影响降水异常。图8给出了土壤湿度异常年随后6月的潜热通量、地表温度、感热通量、边界层高度以及对流有效位能的异常合成图。当5月土壤湿度异常偏湿时，6月关键区蒸发加大使得地表向大气输送的潜热通量增加(图8a)；蒸发需要吸收更多的地面热量，地表温度降低(图8b)，地表向上释放的感热通量减少(图8c)。上述热量异常导致波恩比(即感热通量和潜热通量之比)减小。小的波恩比预示着建立相对窄的边界层(图8d)，低层大气的湿熵偏高[33]。同时，边界层的变薄有利于对流不稳定能量的释放，增加了对流活动的潜能(图8e)，导致局地降水出现正异常。He等[34]的研究也指出土壤湿度增加可以加强对流有效位能，有利于局地对流上升。利用土壤湿度指数回归上述变量，所得结果与合成结果类似(图8a~e、图8f~j)。

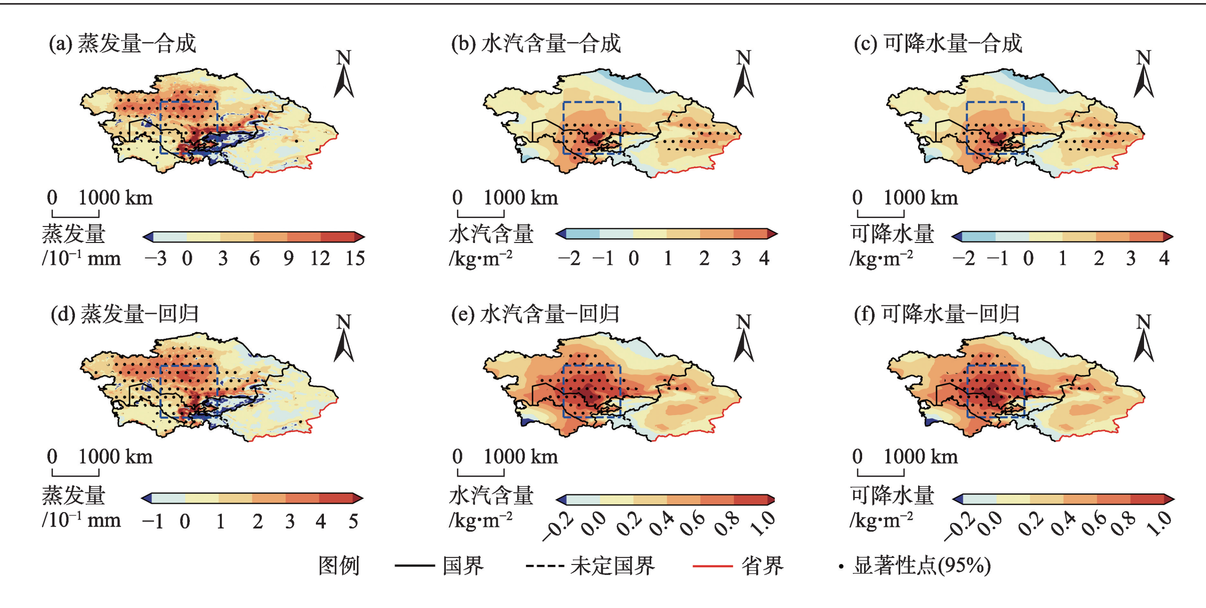


图7 1980—2019年5月土壤湿度高值年减去低值年合成的6月大气异常场和5月土壤湿度指数回归结果

Fig. 7 Atmospheric anomaly field in June synthesized by subtracting the low soil moisture year from the high soil moisture year in May and the regression results of soil moisture index in May during 1980—2019

(a) 潜热通量-合成 (b) 地表温度-合成 (c) 感热通量-合成

潜热通量 /10⁵ J·m⁻² −6 0 6 12 18 24 30 地表温度 /℃ −5 −4 −3 −2 −1 0 1 感热通量 /10⁵ J·m⁻² −30 −24 −18 −12 −6 0 6

(d) 边界层高度-合成 (e) 对流有效位能-合成

边界层高度 /10 m −30 −24 −18 −12 −6 0 6 对流有效位能 /10 J·kg⁻¹ −4 −2 0 2 4 6 8 10 12

(f) 潜热通量-回归 (g) 地表温度-回归 (h) 感热通量-回归

潜热通量 /10⁵ J·m⁻² −4 −2 0 2 4 6 8 10 地表温度 /10⁻¹ ℃ −10 −8 −6 −4 −2 0 2 感热通量 /10⁵ J·m⁻² −10 −8 −6 −4 −2 0 2

(i) 边界层高度-回归 (j) 对流有效位能-回归

边界层高度 /10 m −10 −8 −6 −4 −2 0 2 对流有效位能 /J·kg⁻¹ −6 0 6 12 18 24 30

0 1000 km

图例 国界 未定国界 省界 显著性点(95%)

图8 1980—2019年5月土壤湿度高值年减去低值年合成的6月陆-气能量收支异常和5月土壤湿度指数回归结果

Fig. 8 Land-air energy budget anomalies in June synthesized by subtracting the low soil moisture year from the high soil moisture year in May and the regression results of soil moisture index in May during 1980—2019

综上,当中亚中部关键区5月土壤湿度偏湿时,土壤湿度异常可持续到6月,引起6月局地蒸发量正异常。6月蒸发量增大一方面加大了大气中水汽含量,为局地降水形成提供了有利的水汽条件;另一方面使得地表向上潜热通量增加,感热通量减少,波恩比减小。小的波恩比使得大气边界层变薄,低层大气湿熵增加,对流不稳定能量增大,有利于降水天气的发生。在以上水汽和动力条件的共同作用下,6月局地降水增多。

3 讨论

3.1 ENSO与中亚土壤湿度和降水变化的联系

已有研究指出ENSO对土壤湿度有着重要的影响[35]。例如,El Niño事件导致非洲南部地区土壤湿度增加,热带部分地区土壤湿度下降[36]。那么,ENSO是否可以影响中亚5月土壤湿度呢?此外,前人已经揭示了ENSO对中亚降水有显著影响[6-8],土壤湿度和ENSO对中亚降水的关联和独立性又如何呢?由于ENSO事件存在显著的季节锁相特征,在冬季达到盛期,因此本节采用冬季Niño 3.4指数表征ENSO事件,1980年冬季指1979年12月到1980年2月。

冬季Niño 3.4指数与同年中亚5月土壤湿度和6月降水的相关性均较弱(图略),但与次年中亚5月土壤湿度和6月降水存在显著相关(图9)。由图9可知,前期冬季Niño 3.4指数与随后5月土壤湿度在中亚中东部呈显著正相关,在中亚西部、北部和东南部相关性较弱(图9a);与随后6月降水在中亚南部地区呈显著正相关,其余区域相关性较弱(图9b)。上述结果说明,ENSO事件对随后中亚5月的土壤湿度和6月的降水都有一定影响,但显著影响区域有所差异。值得注意的是,冬季Niño 3.4指数与5月土壤湿度和6月降水在本文所选的中亚中部关键区均表现出一定程度的显著正相关(图9)。进一步计算得到冬季Niño 3.4指数与关键区5月土壤湿度指数和6月降水指数的相关系数分别为0.33和0.70,均通过95%显著性检验(表2)。因此,前冬ENSO事件既可以影响中亚关键区随后5月的土壤湿度变化,也可以影响随后6月的降水变化。

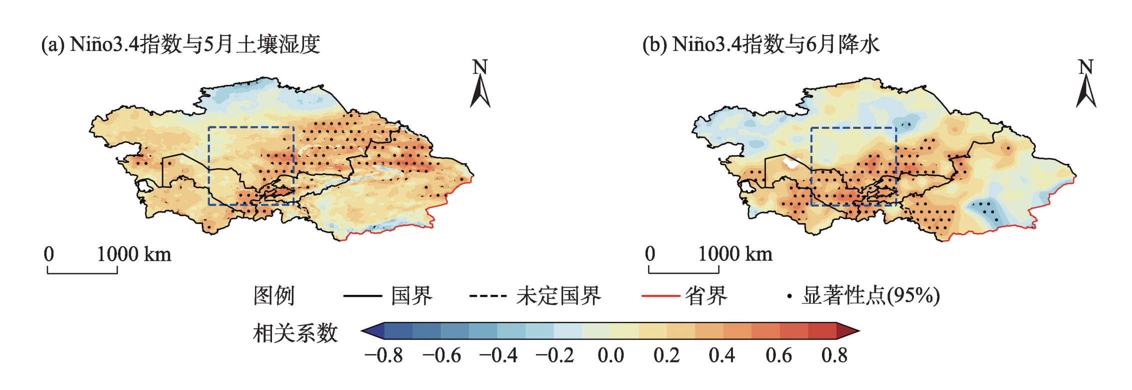


图9 1980—2019年冬季Niño 3.4指数与中亚5月土壤湿度和6月降水量相关系数空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of correlation coefficients of the winter Niño 3.4 index with soil moisture in May and precipitation in June in Central Asia during 1980—2019

3.2 ENSO和中亚土壤湿度对中亚降水影响的关联和独立性

为了揭示出前冬ENSO和5月土壤湿度各自对中亚6月降水的独立影响,考虑排除5月土壤湿度(前期冬季Niño 3.4)指数干扰后,前期冬季Niño 3.4(5月土壤湿度)指数与6月关键区降水指数的偏相关系数。由表2可知,当排除冬季Niño 3.4指数影响后,5月土壤湿度指数与6月降水指数的相关系数为0.67,仍然呈显著正相关。但当排除5月土壤湿度影响后,冬季Niño 3.4指数和次年6月降水指数的相关系数仅为0.15,未通过显著性检验。这一结果说明,5月土壤湿度异常是ENSO影响次年6月中亚中部地区降水的重要媒介,但5月土壤湿度异常可以独立于ENSO影响6月局地降水变化。

本文目前仅依赖统计分析和动力诊断等方法揭示了中亚土壤湿度对降水的影响,后期还应通过数值模式实验验证观测资料所得结果。此外,本文只考虑了土壤湿度和降水的局地相关,中亚夏季降

表2 冬季Niño 3.4指数与5月土壤湿度和6月降水量的相关和偏相关系数

Tab. 2 Correlation and partial correlation coefficients between the winter Niño 3.4 index and soil moisture in May and precipitation in June

	Niño 3.4指数与6月降水量	5月土壤湿度与6月降水量
相关系数	0.33*	0.70*
偏相关系数	0.15	0.67*

注:*表示相关性通过95%信度检验。

水变化是否还受到其他非局地土壤湿度异常的影响,中亚中部土壤湿度异常是否还影响其他非局地区域的降水变化,这些问题都有待深入研究。除了土壤湿度,以往研究指出中亚夏季降水还受到热带印度洋海温异常[37]、南亚高压[11]、东大西洋-西俄罗斯遥相关型[38]、北非副热带高压[39]等因子的影响。各个因子对中亚夏季降水影响的主次和协同关系也值得进一步研究。

4 结 论

(1) 1980—2019年中亚春季逐月土壤湿度总体表现为北部和中部高、西南和东南低的空间分布特征,中国西北是中亚土壤湿度极小区域。塔吉克斯坦、吉尔吉斯坦一带的土壤湿度季节内变化较小,其余区域的土壤湿度从3月到5月逐月降低。中亚西南部3—4月土壤湿度的年际变化剧烈,中国西北土壤湿度年际变化较弱。中亚春季土壤湿度的趋势变化表现出明显的空间差异和季节内差异,其中中亚北部土壤湿度在3月呈显著增加趋势,而4—5月则呈显著减少趋势;中亚西南部3月土壤湿度显著减少;中国西北地区的减少趋势较弱,未通过显著性检验。

(2) 中亚6月降水与前期5月土壤湿度在中亚中部呈局地显著正相关,7—8月降水与前期土壤湿度的相关性不显著。当中亚中部关键区5月土壤湿度偏湿时,土壤湿度异常持续到6月,导致6月局地蒸发量增加,大气可降水量增多;同时,蒸发量的增加使得地表向上潜热通量增加,感热通量减少,波恩比减小。小的波恩比使得大气边界层变薄,低层大气湿熵增加,对流不稳定能量增大,有利于降水天气的发生。在以上有利的水汽和动力条件共同作用下,6月局地降水增多。

(3) 前冬Niño 3.4指数与随后5月中亚中部土壤湿度和6月降水都呈显著正相关,前冬ENSO事件既可以影响中亚关键区随后5月的土壤湿度变化,也可以影响随后6月的降水变化。偏相关分析进一步指出,5月土壤湿度异常是ENSO影响次年6月中亚中部地区降水的重要媒介,但5月土壤湿度异常可以独立于ENSO影响6月局地降水变化。

参考文献(References)

[1] Li Z, Chen Y N, Li W H, et al. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(24): 12345-12356.

[2] Wolff C, Plessen B, Dudashvilli A S, et al. Precipitation evolution of Central Asia during the last 5000 years[J]. The Holocene, 2017, 27(1): 142-154.

[3] Jia J, Liu H, Gao F Y, et al. Variations in the westerlies in Central Asia since 16 ka recorded by a loess section from the Tien Shan Mountains[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 504: 156-161.

[4] Bothe O, Fraedrich K, Zhu X H. Precipitation climate of Central Asia and the large-scale atmospheric circulation[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 108(3-4): 1-10.

[5] Zhang J, Chen Z H, Chen H S, et al. North Atlantic multidecadal variability enhancing decadal extratropical extremes in Boreal late summer in the early twenty-first century[J]. Journal of Climate, 2020, 33(14): 6047-6064.

[6] Mariotti A. How ENSO impacts precipitation in southwest Central Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(16): L16706, doi: 10.1029/2007GL030078.

[7] Hu Z Y, Zhou Q M, Chen X, et al. Variations and changes of annual precipitation in Central Asia over the last century[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(Suppl. 1): 157-170.

[8] Chen Z, Wu R G, Zhao Y, et al. Different responses of Central Asian precipitation to strong and weak El Niño events[J]. Journal of Climate, 2022, 35(5): 1497-1514.

[9] Zhou Y, Huang A N, Zhao Y, et al. Influence of the sea surface temperature anomaly over the Indian Ocean in March on the summer rainfall in Xinjiang[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119(3-4): 781-789.

[10] Huang W, Feng S, Chen J H, et al. Physical mechanisms of summer precipitation variations in the Tarim Basin in northwestern China[J]. Journal of Climate, 2015, 28(9): 3579-3591.

[11] Wei W, Zhang R H, Wen M, et al. Relationship between the Asian westerly jet stream and summer rainfall over Central Asia and north China: Roles of the Indian monsoon and the South Asian High[J]. Journal of Climate, 2017, 30(2): 537-552.

[12] 任国强, 赵勇. 副热带西风急流与中亚夏季降水的关系[J]. 高原

气象, 2022, 41(6): 1425−1434. [Ren Guoqiang, Zhao Yong. Relationship between the subtropical westerly jet and summer rainfall over Central Asia from 1961 to 2016[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(6): 1425−1434.]

[13] Walker J, Rowntree P R. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1977, 103(435): 29−46.

[14] Koster R D, Suarez M J, Higgins W, et al. Observational evidence that soil moisture variations affect precipitation[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(5): 45−41.

[15] Martius O, Wehrli K, Rohrer M. Local and remote atmospheric responses to soil moisture anomalies in Australia[J]. Journal of Climate, 2021, 34(22): 9115−9131.

[16] 丁旭, 赖欣, 范广洲. 青藏高原春季土壤湿度异常与我国夏季降水的联系[J]. 高原气象, 2022, 41(1): 24−34. [Ding Xu, Lai Xin, Fan Guangzhou. Impacts of spring soil moisture anomalies in Qinghai-Xizang Plateau on the summer precipitation variability in China[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(1): 24−34.]

[17] Liu L, Zhang R H, Zuo Z Y. Effect of spring precipitation on summer precipitation in eastern China: Role of soil moisture[J]. Journal of Climate, 2017, 30(22): 9183−9194.

[18] 蒋靖海, 王澄海. 北半球季节性冻融区与北半球夏季降水关系的研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 53−61. [Jiang Jinghai, Wang Chenghai. Study on the relationship between seasonal freezing-thawing areas and summer precipitation in the northern Hemisphere[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 53−61.]

[19] Meng L, Long D, Quiring S M, et al. Statistical analysis of the relationship between spring soil moisture and summer precipitation in east China[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(5): 1511−1523.

[20] Yang K, Wang C H. Seasonal persistence of soil moisture anomalies related to freeze-thaw over the Tibetan Plateau and prediction signal of summer precipitation in eastern China[J]. Climate Dynamics, 2019, 53(3−4): 2411−2424.

[21] Sang Y H, Ren H L, Deng Y, et al. Impacts of late-spring north Eurasian soil moisture variation on summer rainfall anomalies in northern East Asia[J]. Climate Dynamics, 2022, 58(5−6): 1495−1508.

[22] Gao C J, Li G, Chen H S, et al. Interdecadal change in the effect of spring soil moisture over the Indo-China Peninsula on the following summer precipitation over the Yangtze River Basin[J]. Journal of Climate, 2020, 33(16): 7063−7082.

[23] KanthaRao B, Rakesh V. Observational evidence for the relationship between spring soil moisture and June rainfall over the Indian region[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 132(3−4): 835−849.

[24] Graf M, Arnault J, Fersch B, et al. Is the soil moisture precipitation feedback enhanced by heterogeneity and dry soils? A comparative study[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(9): 14332, doi: 10.1002/hyp.14332.

[25] Yao J Q, Chen Y N, Zhao Y, et al. Climatic and associated atmospheric water cycle changes over the Xinjiang, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585(2): 124823, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124823.

[26] Peng D D, Zhou T J, Zhang L X. Moisture sources associated with precipitation during dry and wet seasons over Central Asia[J]. Journal of Climate, 2020, 33(24): 10755−10771.

[27] 高洁, 赵勇, 姚俊强, 等. 气候变化背景下中亚干旱区大气水分循环要素时空演变[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1371−1384. [Gao Jie, Zhao Yong, Yao Junqiang, et al. Spatiotemporal evolution of atmospheric water cycle factors in arid regions of Central Asia under climate change[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1371−1384.]

[28] Yu T, Jiapaer G, Bao A M, et al. Evaluating surface soil moisture characteristics and the performance of remote sensing and analytical products in Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617 (2): 128921, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128921.

[29] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agusti-Panareda A, et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(9): 4349−4383.

[30] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999−2049.

[31] Schneider U, Finger P, Meyer-Christoffer A, et al. Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)[J]. Atmosphere, 2017, 8(3): 52−52.

[32] Dirmeyer P A, Schlosser C A, Brubaker K L. Precipitation, recycling, and land memory: An integrated analysis[J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 10(1): 278−288.

[33] 左志燕. 我国东部土壤湿度异常对东亚夏季风的影响[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2007. [Zuo Zhiyan. Influence of soil moisture anomaly in east China on the East Asian summer monsoon[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2007.]

[34] He K J, Liu G, Wu R G, et al. Effect of preceding soil moisture-snow cover anomalies around Turan Plain on June precipitation over the southern Yangtze River Valley[J]. Atmospheric Research, 2021, 264(2): 105853, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105853.

[35] Solander K C, Newman B D, Barnard H R, et al. The pantropical response of soil moisture to El Niño[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(5): 2303−2322.

[36] Miralles D G, Gash J H, Parinussa R M, et al. El Niño-La Niña cycle and recent trends in continental evaporation[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(2): 122−126.

[37] Zhao Y, Zhang H Q. Impacts of SST warming in tropical Indian Ocean on CMIP5 model-projected summer rainfall changes over Central Asia[J]. Climate Dynamics, 2016, 46: 3223−3238.

[38] Ma Q R, Zhang J, Game A T, et al. Spatiotemporal variability of

summer precipitation and precipitation extremes and associated large-scale mechanisms in Central Asia during 1979—2018[J]. Journal of Hydrology X, 2020, 8: 100061, doi: 10.1016/j.hydroa.2020.100061.

[39] 卢星, 赵勇. 北非副热带高压与中亚夏季降水的关系[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1050−1060. [Lu Xing, Zhao Yong. Relationships between North Africa subtropical high and summer precipitation over Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1050−1060.]

Influences of soil moisture anomalies in May on June precipitation in Central Asia

LIU Wenli, CHEN Zhang, ZHAO Yong, LIANG Yuxin

(School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China)

Abstract: Using RA5 monthly reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts and monthly precipitation records from the Global Precipitation Climatology Centre spanning 1980 to 2019, this study examines the influence of May soil moisture anomalies on subsequent June precipitation variability in Central Asia. The findings unveil the following key insights: (1) The spatial distribution of springtime soil moisture exhibited elevated levels in Central Asia's northern and central regions and lower levels in the southwest and southeast. Maximum standard deviations occurred in southwest Central Asia during March and April. In the north of Central Asia, soil moisture experiences a noteworthy increasing trend in March but displays a declining trend from April to May. Conversely, southwest Central Asia witnessed substantial decreases in March. (2) June precipitation in Central Asia positively correlates with local soil moisture in May. Persistent wet soil moisture anomalies from May to June contribute to increased atmospheric precipitable water, modifying regional evaporation patterns in June. Heightened evaporation leads to increased latent heat flux and reduced sensible heat flux. A small Bowen ratio indicates a relatively shallow boundary layer that promotes low-layer moist entropy and a heightened potential for convective activity. Consequently, June rainfall over the central regions of Central Asia increased. (3) A notable positive correlation exists between soil moisture in May and precipitation in June over middle Central Asia and the preceding winter Niño3.4 index. The influence of the preceding El Nino-Southern Oscillation (ENSO) on June precipitation in middle Central Asia is mediated by May soil moisture. Nonetheless, soil moisture anomalies can independently impact the variability of June precipitation, separate from the influence of ENSO.

Key words: Central Asia; soil moisture; precipitation; evaporation; ENSO